

### 3.5.1 Изучение плазмы газового разряда в неоне

**В работе используются:** стеклянная газоразрядная трубка, наполненная неоном, высоковольтный источник питания, источник питания постоянного тока, делитель напряжения, амперметры, вольтметры, переключатели.

#### Экспериментальная установка

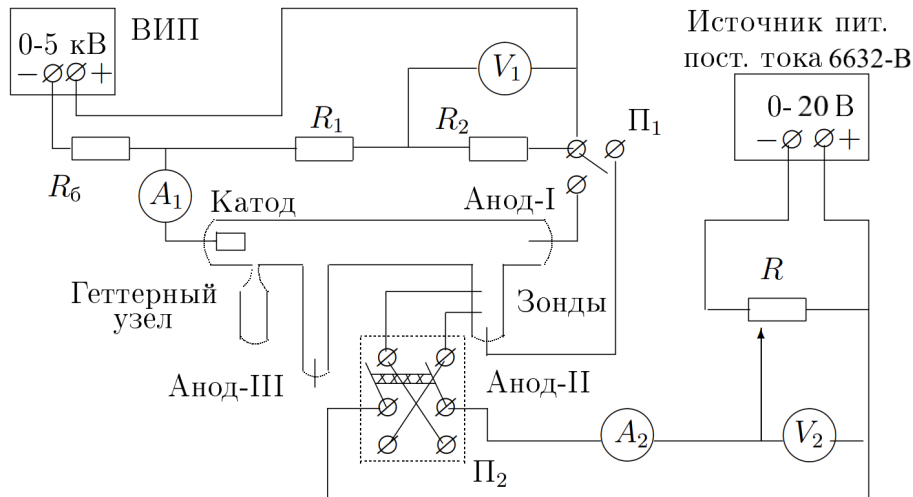


Рис. 1: Схема экспериментальной установки

Схема установки для исследования плазмы газового разряда в неоне представлена на рис.1. Стеклянная газоразрядная трубка имеет холодный (ненагреваемый) полый катод, три анода и *геттерный узел* - стеклянный баллон, на внутреннюю поверхность которого напылена газопоглощающая плёнка (*геттер*). Трубка наполнена изотопом неона  $^{22}\text{Ne}$  при давлении 2 мм рт. ст. Катод и один из анодов (I или II) с помощью переключателя  $\Pi_1$  подключается через балластный резистор  $R_6$  (450 кОм) к регулируемому высоковольтному источнику питания (ВИП) с выходным напряжением до 5 кВ.

При подключении к ВИП анода-I между ним и катодом возникает газовый разряд. Ток разряда измеряется цифровым амперметром  $A_1$ , а падение напряжения на разрядной трубке - цифровым вольтметром  $V_1$ , подключённым к трубке через высокоомный (25 МОм) делитель напряжения с коэффициентом  $(R_1 + R_2)/R_2 = 10$ .

При подключении к ВИП анода-II разряд возникает в пространстве между катодом и анодо-II, где находится двойной зонд, используемый для диагностики плазмы положительного столба.

Зонды изготовлены из молибденовой проволоки диаметром  $d = 0,2$  мм и имеют длину  $l = 5,2$  мм. Они подключены к источнику питания (Agilent 6632-B) через потенциометр  $R$ . Переключатель  $\Pi_2$  позволяет менять полярность напряжения на зондах. Величина напряжения на зондах изменяется с помощью дискретного переключателя «V», выходного напряжения источника питания, а измеряется цифровым вольтметром  $V_2$ . Для измерения зондового тока используется мультиметр  $A_2$ . Анод-III в работе не используется.

## Задание

В работе предлагается измерить вольт-амперную характеристику тлеющего разряда и зондовые характеристики при различных токах разряда и по результатам измерений рассчитать концентрацию и температуру электронов в плазме, плазменную частоту, поляризационную длину, дебаевский радиус экранирования и степень ионизации.

Лабораторная работа выполняется с использованием специальной программы для измерений «ND Measure». Перед выполнением работы рекомендуется ознакомиться с руководством к программе.

### Подготовка к работе

1. Запустите программу «ND Measure»
2. В открывшемся окне нажмите кнопку «Выбрать директорию для сохранения файлов» и выберите папку, в которую будут сохранены файлы, полученные в ходе выполнения лабораторной работы
3. Проверьте, что включены все устройства. В правом верхнем углу статус всех приборов должен быть «Online»

### I. Вольт-амперная характеристика разряда

4. Установите переключатель  $\Pi_1$  в положение «Анод-I». Ручку регулировки выходного напряжения ВИП поставьте в крайнее левое положение, соответствующее нулевому входному напряжению, и включите ВИП в сеть.
5. Плавно увеличивая выходное напряжение ВИП, определите по показаниям вольтметра  $V_1$  напряжение зажигания разряда  $U_{\text{зж}}$  непосредственно перед зажиганием.
6. Перейдите с помощью панели навигации к части «I. ВАХ хар-ка разряда».
7. При нажатии на кнопку «Начать» начнутся измерения.  
В деталях эксперимента можно отслеживать:
  - (a) Статус эксперимента,
  - (b) Время, прошедшее с начала эксперимента,
  - (c) Количество проведённых измерений,
  - (d) Последнее измеренное значение напряжения, В,
  - (e) Последнее измеренное значение тока, мА.
8. Плавно изменяя ток разряда  $I_p$  в диапазоне от 0,5 мА до  $\simeq 5$  мА измерьте ВАХ разряда.
9. После окончания измерений нажмите кнопку «Закончить измерения и провести обработку». Статус эксперимента сменится на «Окончен». На графике будет построена кривая, по наклону которой будет определено максимальное дифференциальное сопротивление разряда  $R_{\text{диф}}$ .
10. Для сохранения графика нажмите правой кнопкой мыши. В открывшемся окне нажмите кнопку «Export» и выбрав необходимое расширение для сохранения.

## II. Зондовые характеристики

11. Уменьшите напряжение ВИП до нуля и переведите переключатель  $\Pi_1$  в положение «Анод-II», переключатель  $\Pi_2$  в положение "+".
12. Плавно увеличивайте напряжение ВИП до возникновения разряда и установите разрядный ток  $I_p \simeq 5\text{мА}$ .
13. Ручку потенциометра  $R$  максимально поверните влево.
14. Перейдите с помощью панели навигации к части «II. Зондовые хар-ки».
15. Перед началом измерения ВАХ-двойного зонда укажите разрядный ток, при котором проводятся измерения.
16. В параметрах эксперимента укажите начальное и конечное напряжение, при котором будут проводиться измерения, а также шаг напряжения и нажмите кнопку «Подтвердить». После выставления параметров эксперимента станет доступна кнопка «Начать».  
(Рекомендуемые параметры: Начальное напряжение - 0.5 В, Конечное напряжение - 19.5 В, Шаг напряжения - 0.25 В)
17. При нажатии на кнопку «Начать» начнутся измерения. В центральном окне будет строиться график.  
В деталях эксперимента можно отслеживать:
  - (a) Статус эксперимента,
  - (b) Время, прошедшее с начала эксперимента,
  - (c) Количество проведённых измерений,
  - (d) Последнее измеренное значение напряжения, В,
  - (e) Последнее измеренное значение тока, мкА.
18. После проведения измерений при положительных напряжениях, статус эксперимента сменится на «Необходима смена полярности». Смените полярность подключения зондов (Переключатель  $\Pi_2$  в положение «-»).
19. Нажмите кнопку смена полярности. Статус эксперимента сменится на «В процессе» и измерения продолжатся при отрицательных напряжениях на зонде.
20. После окончания измерений нажмите кнопку «Закончить измерения и провести обработку». Статус эксперимента сменится на «Окончен». На графике будет построена аппроксимирующая кривая, а в результатах эксперимента появятся рассчитанные температура электронов в плазме и ток насыщения, при указанном токе разряда.
21. Для сохранения графика нажмите правой кнопкой мыши. В открывшемся окне нажмите кнопку «Export» и выбрав необходимое расширение для сохранения.
22. Измерьте ВАХ двойного зонда при токах разряда равных 3 и 1,5 мА.  
Общий отцентрированный график можно посмотреть на вкладке «III. Общий график».  
Результаты всех измерений будут сохранены в указанной директории в формате «.csv».

### III. Обработка результатов

23. Полагая концентрацию электронов  $n_e$  равной концентрации ионов  $n_i$ , определите её, используя формулу Бома:

$$I_{\text{ин}} = 0,4n_e e S \sqrt{\frac{2kT_e}{m_i}} \quad (1)$$

Здесь  $S = \pi \cdot d \cdot l$  - площадь поверхности зонда;

$m_i = 22 \cdot 1,66 \cdot 10^{-27}$  кг - масса иона неона.

24. Рассчитайте плазменную частоту колебаний электронов по формуле:

$$\omega_p = \sqrt{\frac{4\pi n_e e^2}{m_e}} = 5,6 \cdot 10^4 \sqrt{n_e} \quad (2)$$

25. Рассчитайте электронную поляризационную длину  $r_{D_e}$  по формуле:

$$r_{D_e} = \sqrt{\frac{kT_e}{4\pi n_e e^2}} \text{ см.} \quad (3)$$

26. Рассчитайте дебаевский радиус экранирования  $r_D$  по формуле:

$$r_{D_e} = \sqrt{\frac{kT_i}{4\pi n_e e^2}} \text{ см,} \quad (4)$$

где  $T_e \gg T_i$ , а температура ионов равна комнатной ( $T_i \simeq 300\text{K}$ ).

27. Оцените среднее число ионов в дебаевской сфере:

$$N_D = \frac{4}{3}\pi r_D^3 n_i \text{ см.} \quad (5)$$

28. Оцените степень ионизации плазмы (долю ионизированных атомов  $\alpha$ , если давление в трубке  $P \simeq 2$  торр (2 мм рт. ст.):  $\alpha = \frac{n_i}{n}$ , где  $n$  - общее число частиц в единице объёма.

$$N_D = \frac{4}{3}\pi r_D^3 n_i \text{ см.} \quad (6)$$

29. Постройте графики зависимостей электронной температуры и концентрации электронов от тока разряда:  $T_e(I_p), n_e(I_p)$ .

30. Оцените погрешности и сведите результаты расчётов в таблицу:

$R_{\text{диф}}$ , Ом	$I_p$ , мА	$kT_e$ , эВ	$n_e$ , см <sup>-3</sup>	$\omega_p$ , рад/сек	$r_{D_e}$ , см	$r_D$ , см	$\langle N_D \rangle$	$\alpha$